内蒙古巴彦淖尔市冰雹云移动路径及其特征

于水燕[1,2,3,4]， 毕力格[2,3,4]， 苏立娟[2,3,4]， 刘继东[5]， 史金丽[2,3,4]，
衣娜娜[2,3,4]， 樊茹霞[2,3,4]， 许志丽[2,3,4]

（1. 南京信息工程大学，江苏 南京 210044；2. 中国气象局云雾物理环境重点实验室，北京 100081；
3. 内蒙古自治区气象科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010051；4. 内蒙古自治区人工影响天气重点实验室，
内蒙古 呼和浩特 010051；5. 巴彦淖尔市气象局，内蒙古 巴彦淖尔 015006）

摘 要： 利用内蒙古西部巴彦淖尔市2009—2019年67个地面防雹作业点人工记录及临河站新一代天气雷达资料，统计分析了该地区冰雹云移动路径及其特征。结果表明：（1）近11 a巴彦淖尔市冰雹云的移动路径主要为西北路径、西南路径和偏西路径。西北路径冰雹云的发生频率最高（46.70%），且其成熟阶段的移动距离最长（23.86 km），持续时间也较长（40.25 min）。（2）夏季（6—8月）要重点关注冰雹灾害影响，其中7—8月冰雹云在较短时间（14.09 min、17.00 min）及较短移动距离(5.49 km、8.48 km)内就可以发展，在成熟阶段缓慢移动、持续地影响云系覆盖区域，是冰雹云致灾性最强的2个月。（3）冰雹云形成集中在13:00—15:00，而降雹主要发生在14:00—17:00。（4）巴彦淖尔市冰雹云降雹机制主要以水汽条件和动力条件为主，可达79.44%。动力条件降雹以西北路径为主（68.57%），水汽条件降雹以西北、西南及偏西路径为主（96.00%）。从近11 a巴彦淖尔市冰雹云的移动路径特征可以看出，该地区夏季西北路径的冰雹云灾害性最强。

关键词： 冰雹云；移动路径；降雹；内蒙古西部

内蒙古是国内出现降雹次数最多且造成雹灾最严重的地区之一，也是我国华北地区降雹的最大中心[1-4]。内蒙古河套地区每年因冰雹灾害导致的经济损失达6.2×10^8元，农作物受灾面积达3.3×10^6 hm^2，严重影响农业生产和农民收入。

冰雹天气是一种剧烈的、局地的、致灾性强的气象灾害，国内外多位学者分析了冰雹天气的雹云结构[5]、雹云雨滴谱特征[6]、探空物理量特征[7-8]、时空分布特征[7-14]、雷达参量特征[12-17]等，并提出了冰雹识别模型[17-19]及预警指标[20-23]。吴海英等[24]模拟了一次冰雹过程，发现其发展演变与中尺度重力波有关。在研究冰雹的时空分布特征、冰雹云结构及其机理过程中，国内学者对冰雹云的移动路径做了统计分类。王昀等[21-22]分别对天山北侧37次冰雹云个例及天山南侧喀什地区的33次冰雹云个例进行追踪，买合皮热提·吾拉木等[10]对阿克苏地区冰雹云活动规律进行了统计，热苏力·阿不拉等[11]对南疆渭干河-库车河流域绿洲的冰雹云路径进行分类，分别得到了天山、阿克苏及南疆渭干河-库车河流域地区冰雹云的主要移动路径。

巴彦淖尔市是内蒙古主要的粮食产区之一。该地区冰雹频发，一般发生在农作物生长季节（4—9月），每年农作物均会遭受不同程度的冰雹危害，轻则减产，重则颗粒无收[25]。该地区以往冰雹的研究大多集中在时空分布、雷达特征参量及预警指标等方面，对冰雹云移动路径的研究较少。因此，了解巴彦淖尔市近十几年来冰雹云的移动路径，探讨不同移动路径下冰雹云的时空发展演变特征，对于当地人工防雹作业、农业生产及生态环境保护有十分重要的意义。

收稿日期： 2021-11-11； **修订日期：** 2022-03-23
基金项目： 国家自然科学基金重点项目（42030604）；西北区域人工影响天气能力建设项目（ZQC-R18217/RYSY201906）；中国气象局创新发展专项（CXFZ2022J033）；内蒙古气象局科技创新项目（nmqxkjcx202205）；中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题（2020Z00705）；内蒙古自然科学基金面上项目（2021MS04026）
作者简介： 于水燕（1989-），女，工程师，主要从事人工影响天气研究. E-mail: 330579259@qq.com
通讯作者： 毕力格. E-mail: 54551072@qq.com

本文利用巴彦淖尔市67个防雹作业点人工记录及临河站天气雷达对2009—2019年冰雹云的移动路径进行统计分类，得到影响该地区的主要冰雹云移动路径，并对冰雹云各生命阶段的时空演变特征进行分析，为人工防雹作业及优化防雹作业点设置提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区主要针对内蒙古西部的巴彦淖尔市，该地区位于内陆深处的内蒙古高原，全市东西长378 km，南北宽238 km，面积6.4×10^4 km^2。阴山山脉自西向东横亘中间，形成3种不同的地貌：巴彦淖尔市中部为阴山山地、北部为乌拉特草原、南部为河套平原，研究区属于温带大陆性气候[25]。其中，乌拉特草原以畜牧业为主；河套平原是重要的农业生产区，也是冰雹的多发区[25]。近年来，巴彦淖尔市生态环境综合敏感性以中度及重度敏感区为主[26]。重要的农牧业生产区冰雹频发，且生态环境敏感性较高。鉴于此，了解该地区冰雹云的移动路径及其特征有利于生态环境保护和农牧业生产。

1.2 数据来源与处理

选取2009—2019年巴彦淖尔市268次冰雹个例资料，包括临河站天气雷达资料及67个防雹作业点人工记录。雷达资料的时间间隔为6 min，防雹作业点人工记录包括站号、经纬度、降雹开始时间及降雹持续时间等。按照防雹作业点人工观测记录的降雹点位置以及降雹开始时间，对照新一代天气雷达资料，剔除无雷达资料、回波盲区及记录不全等个例，共筛选出107次降雹个例作为研究对象[27]。

1.3 数据处理方法

将107次降雹个例的影响云系称为冰雹云。利用雷达资料及防雹作业点人工观测记录，统计了冰雹云初生、发展、降雹及减弱的时间和位置（由于雷达覆盖范围有限，没有统计冰雹云完全消失的时间和位置），初步得到了冰雹云的移动路径。冰雹云初生、发展、降雹及减弱各个生命节点的判定方法如下：(1) 初生：根据降雹点及降雹时间确定降雹云团，追踪降雹云团到云团初生的位置，将该位置确定为云团的初生位置（文中107个个例的初生位置均在雷达探测区域内）；(2) 发展：追踪初生的冰雹云，若冰雹云回波强度在6 min内增加5 dBz以上，回波强度大于45 dBz，且冰雹云覆盖范围增大，则认为冰雹云在该时刻、该位置迅速发展；(3) 降雹：对照人工观测记录的降雹时间、降雹位置、回波的强中心位置及回波的垂直剖面结构等因素综合确定降雹点位置及时间，以地面人工观测记录为主；(4) 减弱：若冰雹云的强中心回波值小于45 dBz，且大范围回波强度在30~35 dBz之间，则认为冰雹云在该处减弱。本文中提到的冰雹云移动路径是指冰雹云在重要时间节点及重要转折点处回波中心位置的连线。

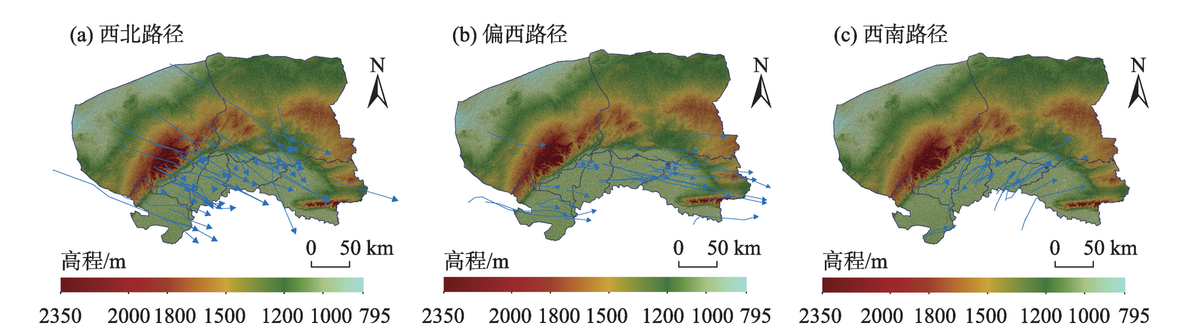
将冰雹云的发展演变划分为3个阶段：发展阶段、成熟阶段及消散阶段。发展阶段定义为从初生至发展节点之间；成熟阶段定义为从发展至降雹节点之间；消散阶段定义为从降雹至减弱节点之间。发展阶段代表了冰雹云的初步发展阶段；成熟阶段代表了冰雹云发展最为旺盛的阶段，包括降雹过程；消散阶段代表了冰雹云的减弱阶段。

2 结果与分析

2.1 冰雹云移动路径特征

由图1可知，巴彦淖尔市冰雹云的移动路径大致可以分为以下5个方向：西北路径（50次，46.7%）、西南路径（28次，26.2%）、偏西路径（23次，21.5%）、偏北路径（4次，3.7%）、东北路径（2次，1.9%）（偏北路径和东北路径发生较少，图略）。巴彦淖尔市冰雹云移动的西南路径和偏西路径有路径转折，不确定性更大一些。

2.1.1 冰雹云移动路径月变化　由表1可知，2009—2019年影响巴彦淖尔市的冰雹主要发生在5—9月。其中，5月为春季、6—8月为夏季，9月为秋季。9月和5月出现冰雹的次数最少，分别为6次和8次。5月出现的冰雹多以西北（WN）和西南（WS）路径为主，而9月出现的冰雹多以西北（WN）和偏西（W）路径为主。6月和7月是冰雹发生的高频月，8月次之，冰雹的发生频次分别为36次、34次和23次。6月出现冰雹多以西北（WN）和西南（WS）路径为主，7月出现冰雹多以西北（WN）、西南（WS）及偏西（W）路径为主，8月出现冰雹多以西北（WN）和偏西（W）路径为主。因此，对于巴彦淖尔市地区，夏季（6—8月）要重点关注冰雹灾害影响，尤其是西



注:底图采用内蒙古自治区自然资源厅标准地图制作,审图号为蒙S(2019)33号,对底图边界无修改。暖色部分为地势较高的地区,冷色部分为地势较为平坦的地区,南部的绿色区域为河套平原地区,中部的黄色及红色区域为阴山山脉。下同。

图1 2009—2019年巴彦淖尔市冰雹云移动路径

Fig. 1 Moving paths of hail clouds in Bayannur from 2009 to 2019

表1 不同月份不同路径冰雹云出现的频次

Tab. 1 Frequency of hail clouds with different paths in different months /times /次

	路径					
	WN	WS	W	N	EN	总计
5月	3	4	1	–	–	8
6月	20	10	5	–	1	36
7月	12	11	8	3	–	34
8月	12	3	6	1	1	23
9月	3	–	3	–	–	6
5—9月	50	28	23	4	2	107

注:“–”表示无冰雹云。

北、西南及偏西路径方向的冰雹影响。

为进一步了解不同季节冰雹云的移动特征,统计了不同月份冰雹云各生命阶段的持续时间及移动距离(图2)。相对来说,7月、8月的冰雹云在较短时间(14.09 min、17.00 min)及较短距离(5.49 km、8.48 km)内迅速发展,但其成熟阶段的距离较长,影响范围较广。而5月、6月、9月的冰雹云发展阶段的持续时间相对来说较长(26.43 min、27.86 min、24.83 min),6月的冰雹云在成熟阶段移动了26.66 km。7月、8月冰雹云的移动速度相对缓慢,平均为7.90 m·s^{-1}和8.26 m·s^{-1};5月和6月的冰雹云移动速度较快,平均为11.97 m·s^{-1}和11.56 m·s^{-1};9月的冰雹云在发展阶段移动速度最快,可达14.4 m·s^{-1}。总体而言,7月、8月的冰雹云在较短时间及较短移动距离内发展增强,但在成熟阶段移动缓慢、持续地影响云系覆盖的大范围区域,是冰雹云致灾性最强的2个月。

2.1.2 冰雹云初生时间、降雹时间日变化 综上所述,发生在6—8月的冰雹云尤其值得关注,将冰雹云初生时间进行了分类,分为上午(8:00—11:00)、中午(11:00—14:00)、下午(14:00—17:00)、傍晚(17:00—20:00)、夜间(20:00—24:00)5个时段。上午时段出现了7次,中午时段出现了31次,下午时段出现了52次,傍晚时段出现了20次,夜间时段出现了4次。其中,冰雹云初生时间在13:00—14:00出现了

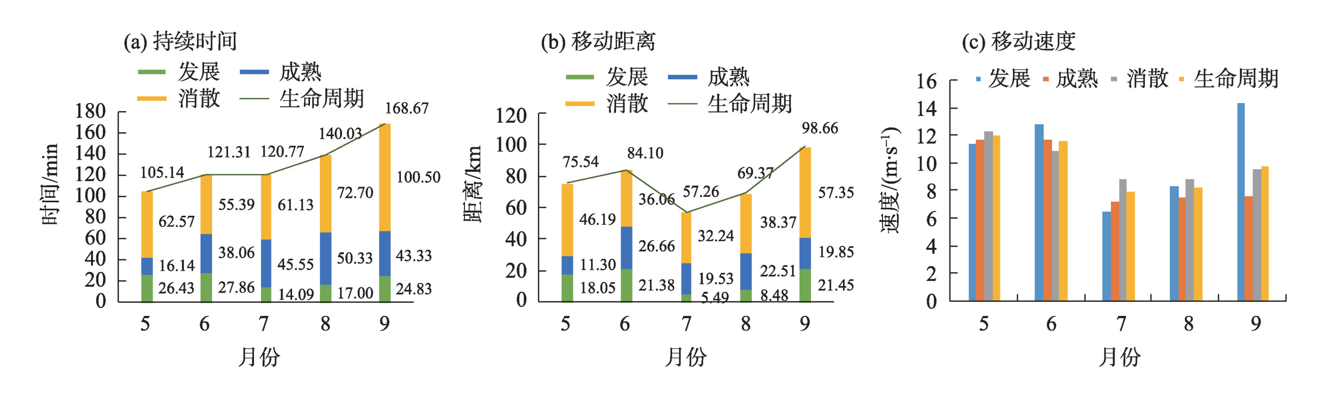


图2 冰雹云各生命阶段持续时间(a)、移动距离(b)、移动速度(c)月变化

Fig. 2 Monthly changes in the duration (a), moving distance (b), and moving speed (c) of each life stage of hail cloud

19次，14:00—15:00出现了27次，15:00—16:00出现了10次，是冰雹云初生频次最高的3个时段。

将降雹时间也按照类似的方法进行分类，分为上午(8:00—11:00)、中午(11:00—14:00)、下午(14:00—17:00)、傍晚(17:00—20:00)、夜间(20:00—02:00)5个时段。上午时段出现了4次，中午时段出现了12次，下午时段出现了60次，傍晚时段出现了23次，夜间时段出现了9次。其中，14:00—15:00出现了25次，15:00—16:00出现了21次，16:00—17:00出现了14次，是发生降雹频次最高的3个时段。

对上述提到的冰雹云初生时间及降雹时间自西向东进行了展示，图3a中灰色三角形为冰雹云初生频次最高的时段(13:00—15:00)，可以看出，冰雹云初生点随经度、纬度并没有很大的变化(随纬度变化图略)。图3b可以看到，冰雹云降雹主要集中在14:00—17:00，且随经度、纬度也没有明显的变化(随纬度变化图略)。

2.2 冰雹云各生命阶段特征分析

2009—2019年巴彦淖尔市冰雹云各生命阶段的持续时间和移动距离求平均值(图4)发现，冰雹云发展阶段平均需移动13.71 km，历时21.20 min；成熟阶段平均需移动22.10 km，历时41.74 min；消散阶段平均需移动72.88 km，历时63.65 min。冰雹云常以较快的速度发展，成熟后能维持较长时间，且降雹后仍会以较强的组合反射率向前移动较长时间、较长距离。

在对冰雹云移动路径有了整体认识的基础上，进一步对比了不同移动路径的冰雹云在不同生命阶段的演变时间和移动距离特征(图5)。从时间上来看(图5a)，各个路径的发展阶段耗时最短，消散阶段耗时最长。就发展阶段而言：(1) 西北路径下，42.00%的冰雹云翻越山脉，其发展需要的时间最长，平均为27.48 min；(2) 相对来说，西南路径、偏西路径所需的时间较为一致，分别为15.42 min和15.00 min；(3) 东北路径所需时间为13.00 min，耗时最短的则为偏北路径(12.00 min)。从成熟阶段来看，持续时间从长到短为：偏北路径(64.50 mim)-西南路径(48.08 mim)-西北路径(40.25 mim)-东北路径(36.50 mim)-偏西路径(33.76 mim)。

从距离上看(图5b)，各个路径的移动距离与持续时间有较为一致的地方，即发展阶段的移动距离最短，消散阶段的移动距离最长(除东北路径)。西北路径各发展阶段的距离及总距离均为最长，而东北路径的移动距离均最短。西北路径的冰雹云大

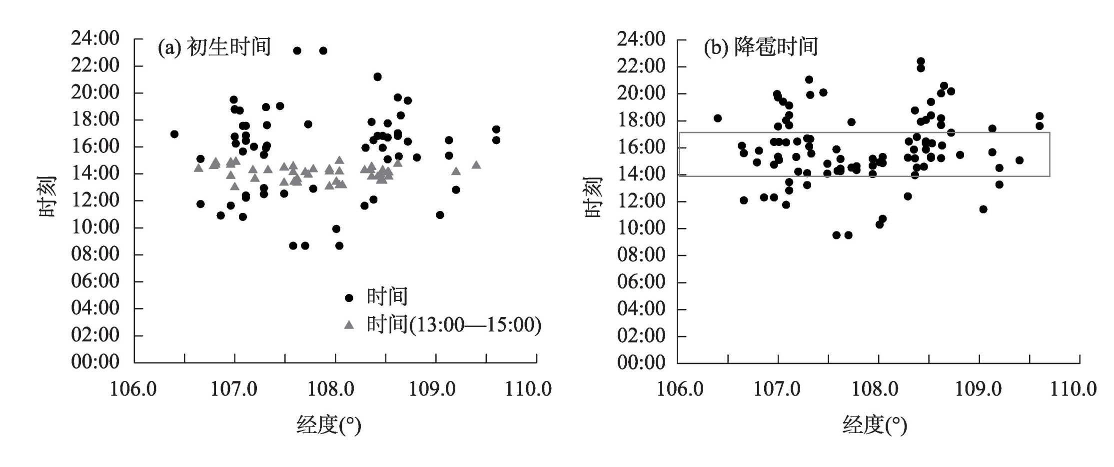


图3 冰雹云初生时间(a)、降雹时间(b)自西向东变化

Fig. 3 Time changes of hail cloud initiation (a) and hail (b) from west to east

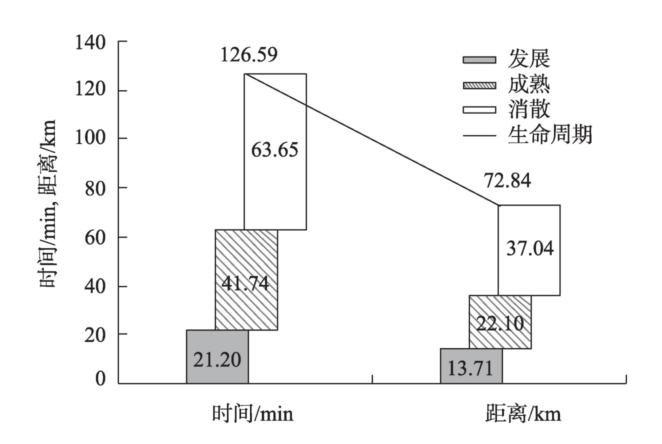


图4 冰雹云各生命阶段持续时间及移动距离变化

Fig. 4 Changes in duration and moving distance of hail clouds in various life stages

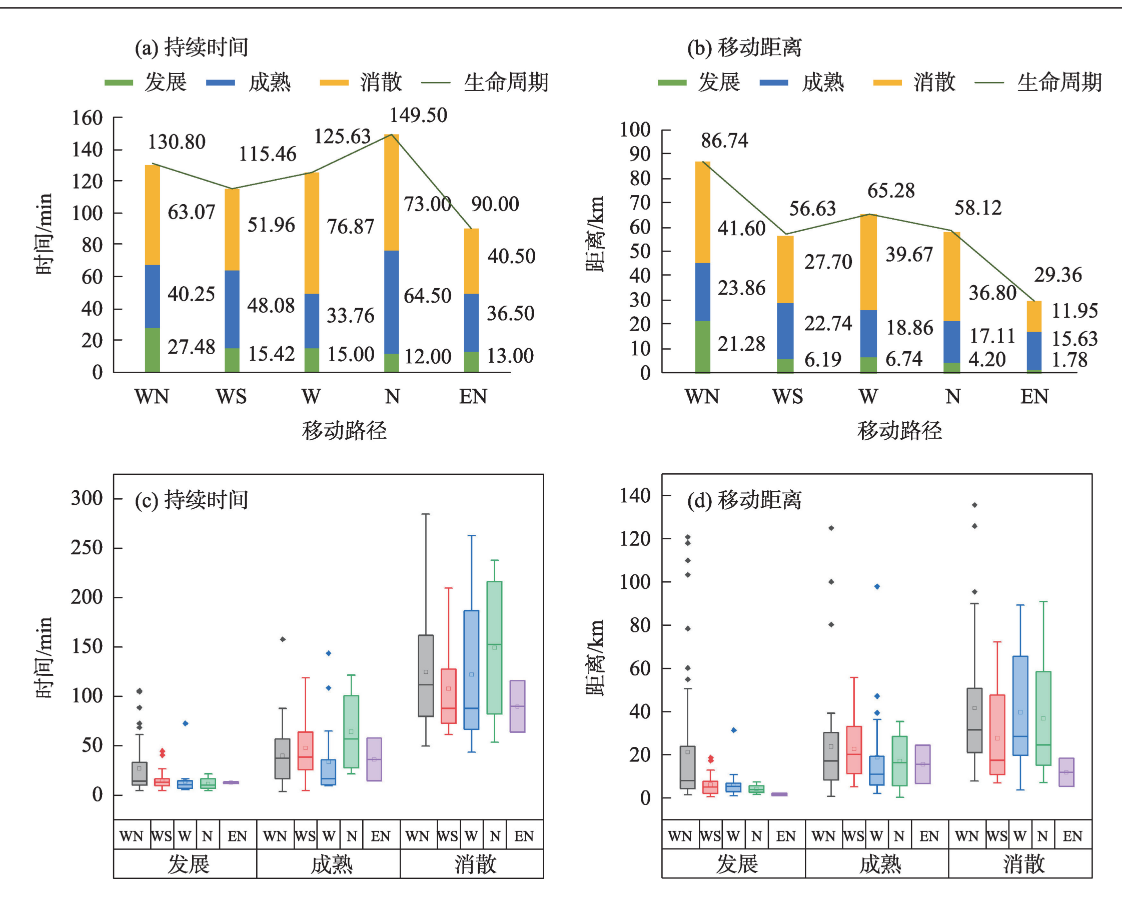


图5 冰雹云不同移动路径各生命阶段持续时间(a、c)、移动距离(b、d)

Fig. 5 Duration (a, c) and moving distance (b, d) of each life stage of different moving paths of hail cloud

多要翻越山脉,所以移动距离较长;而东北路径的冰雹云多为局地触发的对流单体,移动距离最短。比较而言,西北路径冰雹云的发生频率最高,且其成熟阶段的移动距离最长,成熟阶段的持续时间也较长,灾害性也最强。

除此之外,在不同路径下、不同生命阶段冰雹云的持续时间及移动距离做了箱线图展示(图5c,图5d)。对于发展阶段来说,无论是持续时间还是移动距离,其变化幅度最小,尤其是西南路径、偏西路径、偏北路径及东北路径。冰雹云的各生命阶段而言,无论是持续时间还是移动距离,其平均值基本都大于50%分位值,短时间和短距离的样本较多且较为集中,而长时间长距离的样本比较分散,且有个别极大的样本出现。这也侧面反映了冰雹云的发展演变有很大的不确定性,影响冰雹云发展演变的因素很多,如热力条件、水汽条件、动力条件等等。

在对不同路径下各生命阶段持续时间及移动距离变化有基本了解后,基本可以得到不同路径下各生命阶段冰雹云的平均移动速度(图6)。西北路径冰雹云的移动速度最快,且其发展阶段的移动速度最快,西南路径和偏西路径的冰雹云移动速度基本相当,偏北路径和东北路径的冰雹云移动速度相对较慢。进一步验证了本文的结论,西北路径的冰雹云危害性最强,其持续时间长、移动距离远、移动

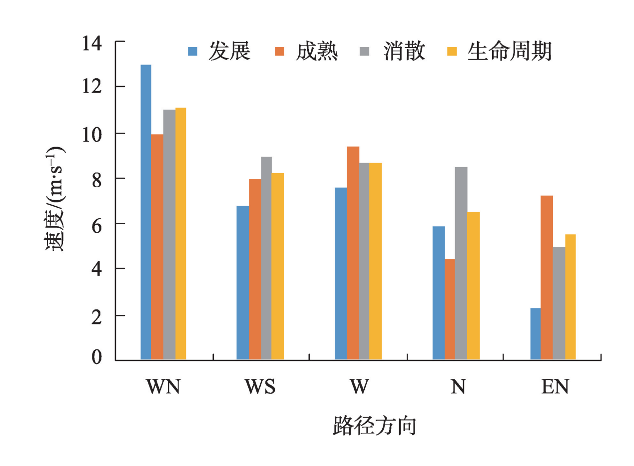


图6 冰雹云不同移动路径不同生命阶段移动速度变化

Fig. 6 Changes in the moving speed of hail clouds in different moving paths and different life stages

速度快，是需要特别关注的冰雹云移动路径。

2.3 冰雹云路径与地形地貌的关系分析

为进一步了解冰雹云发展及降雹的地形特点，本文得到了不同路径冰雹云的初生位置及降雹点位置(图7)。冰雹云初生点总体上分布比较分散，其中，西北路径冰雹云的初生点分布在山南侧、山上、山北侧，基本没有规律；而其他几个路径的冰雹云初生点则基本分布在山南侧(图7a)。冰雹云降雹点的位置大多都集中在山南侧(图7b)，山南侧的河套平原地区主要是农田耕地，冰雹在这些位置下落会带来很大的经济损失。

为进一步了解冰雹云降雹前移动路径的地形特点，将冰雹云移动路径、发展点、降雹点与内蒙古地貌图叠加发现：在107次降雹个例中，对于发展点而言，有46个在山上发展，26个在沙漠发展，23个为平原发展，12个为过水系或黄河边发展；对于降雹点而言，有50个为过水系或黄河边降雹，35个为山上降雹，4个为沙漠降雹，18个为平原降雹。按照对流天气过程产生的3个基本条件分类如下：(1)将过水系和黄河边的影响归为水汽条件影响；(2)将山的影响归为动力条件影响；(3)将沙漠的影响归为热力条件影响；平原影响未经过上述3种条件的影响，归为无明显特征。由此统计结果可以发现(表2)，有46个为动力条件发展，26个为热力条件发展，12个为水汽条件发展，23个为无明显特征；有50个为水汽条件降雹，35个为动力条件降雹，4个为热力条件降雹，18个为无明显特征。动力条件和热力条件是冰雹云发展的主要条件，水汽条件和动力条件是冰雹云降雹的主要条件。

对于冰雹云发展而言(图8a)，由于动力条件发展的46个个例中，35个西北路径，6个偏西路径，3个偏北路径，东北路径和西南路径各1个。由于热力条件发展的26个个例中，12个西南路径，7个西北路径，6个偏西路径，1个东北路径。由于水汽条件发展的12个个例中，7个西南路径，3个偏西路径，2个西北路径。由动力条件发展的冰雹云以西北路径为主(76.09%)，由热力条件发展的冰雹云则主要以西南、西北和偏西路径为主(96.15%)，由水汽条件发展的冰雹云相对较少一些。

对于冰雹云降雹而言(图8b)，水汽条件降雹的50个个例中，21个西北路径，18个西南路径，9个偏西路径，偏北和东北路径各1个；动力条件降雹的35个个例中，24个西北路径，6个偏西路径，3个偏北路径，东北路径和西南路径各1个；热力条件降雹的4个个例中，3个偏西路径，1个西南路径。水汽条件降雹的冰雹云以西北路径、西南路径及偏西路径为主(96.00%)，而动力条件降雹的冰雹云则主要以西北路径为主(68.57%)，水汽条件降雹的冰雹云不确

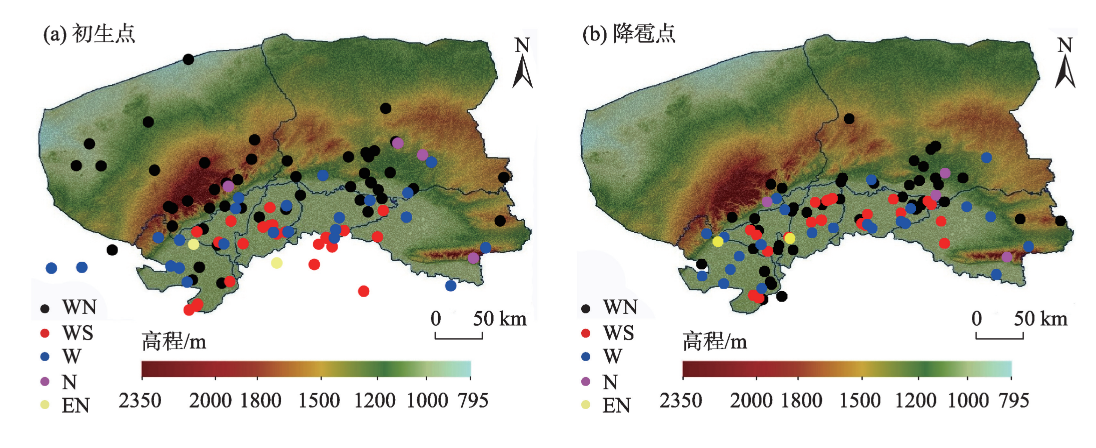


图7 冰雹云不同路径初生点(a)与降雹点(b)位置的分布

Fig. 7 Location distribution of hail cloud initiation (a) and hail (b) of different paths

表2 冰雹云发展、降雹的地貌特点

Tab. 2 Geomorphological characteristics of hail cloud development and hail

冰雹云各阶段影响条件	水汽	动力	热力	无明显特征
发展	12个/11.21%	46个/42.99%	26个/24.30%	23个/21.50%
降雹	50个/46.73%	35个/25.23%	4个/3.74%	18个/24.30%

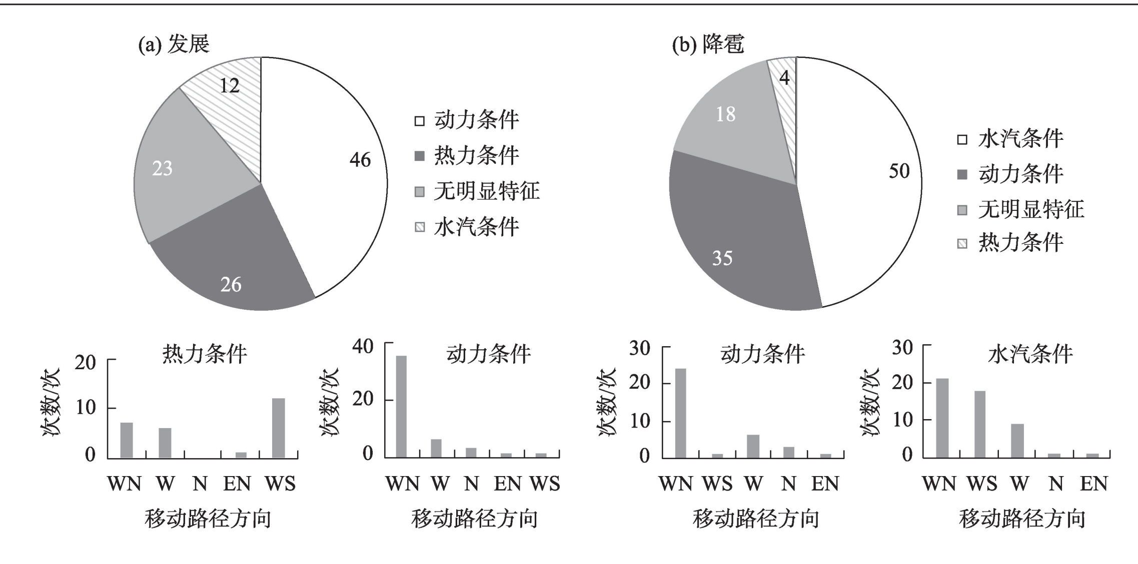


图8　冰雹云发展(a)、降雹(b)影响条件及移动路径分布

Fig. 8　Impact conditions and paths distribution of hail cloud development (a) and hail (b)

定性更大一些。

冰雹云在发展、降雹过程中，影响条件以动力+动力(32次)、热力+水汽(17次)、动力+水汽(13次)为主(57.94%)。在冰雹云的发展过程中，以动力和热力条件为主(67.29%)；在冰雹云降雹过程中，以水汽和动力条件为主(79.44%)。

3　结　论

巴彦淖尔市地处内蒙古西部山脉与平原接壤地带，通过对巴彦淖尔市冰雹云移动路径特征分析，得出以下结论：

(1) 巴彦淖尔市冰雹云的移动路径主要为西北路径、西南路径和偏西路径。西北路径下，42.00%的冰雹云要翻越山脉，其发展所需时间最长(27.48 mim)；偏北路径的冰雹云多为局地发展，其所需时间最短(12.00 mim)。冰雹云成熟后能维持33.76~64.50 mim，且偏北、西南、西北路径维持的时间较长。西北路径的冰雹云发生频率最高，在成熟阶段移动距离最长、持续时间也较长，再加上其移动速度快，是特别需要关注的冰雹云移动路径。在人工影响天气作业过程中，可以根据冰雹云发展的移动方向，预判其移动路径及持续时间，为抓住有效作业时机提供参考。

(2) 夏季(6—8月)，要重点关注该地区的冰雹灾害影响。其中，7月、8月冰雹云在较短时间(14 min、17 min)及较短移动距离(5 km、8 km)内迅速发展，并在成熟阶段缓慢移动、持续地影响云系覆盖区域，是冰雹云致灾性最强的2个月。该地区冰雹云初生频次最高的时段集中在13:00—15:00，而降雹主要发生在14:00—17:00，该结论可以为当地人工防雹预警、作业提供参考。

(3) 巴彦淖尔市冰雹云在发展过程中，以动力和热力条件为主(67.29%)；在降雹过程中，以水汽和动力条件为主(79.44%)。由动力条件发展的冰雹云以西北路径为主(76.09%)，由热力条件发展的冰雹云则主要以西南、西北和偏西路径为主(96.15%)；水汽条件降雹的冰雹云以西北路径、西南路径及偏西路径为主(96.00%)，而动力条件降雹的冰雹云则主要以西北路径为主(68.57%)。

参考文献(References)：

[1] 韩经纬, 王海梅, 乌兰, 等. 内蒙古雷暴、冰雹灾害的评估分析与防御对策研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 31-38. [Han Jingwei, Wang Haimei, Wu Lan, et al. The analysis and assessment on thunderstorm and hail disasters and the countermeasures in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(7): 31-38.]

[2] 赵金涛, 岳耀杰, 王静爱, 等. 1950—2009年中国大陆地区冰雹灾害的时空格局分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 83-92. [Zhao Jintao, Yue Yaojie, Wang Jing'ai, et al. Study on spatio-temporal pattern of hail disaster in China mainland from 1950 to 2009 [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 83-92.]

[3] 杨丽桃, 邸瑞琦, 刘兴汉. 内蒙古地区冰雹灾害对农牧业生产的影响及其防御[J]. 内蒙古气象, 2006(3): 29-30. [Yang Litao, Di Ruiqi, Liu Xinghan. Influence of hail disaster on agriculture and animal husbandry production in Inner Mongolia area and its defense[J]. Meteorology of Inner Mongolia, 2006(3): 29-30.]

[4] 杨贵名, 马学款, 宗志平. 华北地区降雹时空分布特征[J]. 气象, 2003, 29(8): 31-34. [Yang Guiming, Ma Xuekuan, Zong Zhiping. Characteristics of hailfall in North China[J]. Meteorology Monthly, 2003, 29(8): 31-34.]

[5] 龚佃利, 王洪, 许焕斌, 等. 2019年8月16日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J]. 气象学报, 2021, 79(4): 674-688. [Gong Dianli, Wang Hong, Xu Huanbin, et al. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong Province[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(4): 674-688.]

[6] 王俊, 王文青, 王洪, 等. 短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1071-1086. [Wang Jun, Wang Wenqing, Wang Hong, et al. Characteristics of the raindrop size distribution during a short-time heavy rainfall and a squall line accompanied by hail[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1071-1086.]

[7] Cheng Xiuping, Shan Chengtao, Pei Gasang, et al. Temporal-spatial distribution and short-range prediction indicators of hail weather in east central Haixi Prefecture of Qinghai Province[J]. Meteorological and Environmental Research, 2013, 4(4): 21-25.

[8] 马荣君, 李潇斐, 毛彦霖, 等. 陕西省冰雹气候变化特征及其关键影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 767-773. [Ma Rongjun, Li Xiaofei, Mao Yanlin, et al. Characteristics and causes of climate change in hail in occurrence Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 767-773.]

[9] 冯晓莉, 马占良, 管琴, 等. 1980—2018年青海高原冰雹分布特征及其关键影响因素分析[J]. 气象, 2021, 47(6): 717-726. [Feng Xiaoli, Ma Zhanliang, Guan Qin, et al. Spatio-temporal characteristics of hail and its influence factors in Qinghai Plateau during 1980-2018[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(6): 717-726.]

[10] 买合皮热提·吾拉木, 热苏力·阿不拉, 玉苏甫·买买提, 等. 阿克苏地区冰雹时空变化和灾害特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 108-115. [Mahpiret Ghulam, Rasul Abla, Yusup Mamat, et al. Spatiotemporal changes of hail and disaster characteristics in Aksu Prefecture[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 108-115.]

[11] 热苏力·阿不拉, 牛生杰, 玉素甫·阿不拉, 等. 1970—2013年南疆渭干河-库车河流域绿洲冰雹时空变化特征和棉花受灾分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1556-1564. [Rasul Abla, Niu Shengjie , Yusup Abla, et al. Analysis of the spatial and temporal variation characteristics of hail events and damaged cotton in the Ogan-Kuchar River oases of southern Xinjiang during 1970-2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1556-1564.]

[12] 刘君, 肖秀珠, 张维. 福建西部近10年冰雹雷达资料统计分析[J]. 气象科技, 2013, 41(2): 339-342. [Liu Jun, Xiao Xiuzhu, Zhang Wei. Analysis of hail radar data in recent 10 years over western Fujian[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(2): 339-342.]

[13] 王若升, 张彤, 樊晓春, 等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 373-377. [Wang Ruosheng, Zhang Tong, Fan Xiaochun, et al. Analysis of the climate features and radar echo of the hail weather in Pingliang of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 373-377.]

[14] 赵文慧, 姚展予, 贾烁, 等. 1961—2015年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 539-551. [Zhao Wenhui, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of hail duration in China during 1961-2015 and its possible influence factors[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(3): 539-551.]

[15] Roxana Cica, Sorin Burceaa, Roxana Bojariua. Assessment of severe hailstorms and hail risk using weather radar data[J]. Meteorological Applications, 2015, 22: 746-753.

[16] 鲁德金, 陈钟荣, 袁野, 等. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J]. 气象, 2015, 41(9): 1104-1110. [Lu Dejin, Chen Zhongrong, Yuan Ye, et al. Analysis on radar echo characteristics of hail clouds in spring and summer of Anhui Province[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(9): 1104-1110.]

[17] Neil G, Towery, Stanley A, et al. Characteristics of hail-producing radar echoes in Illinois[J]. Monthly Weather Review, 1970, 98(5): 346-353.

[18] López L, Sánchez J L. Discriminant methods for radar detection of hail[J]. Atmospheric Research, 2009, 93(1): 358-368.

[19] 路志英, 刘海, 贾惠珍, 等. 基于雷达反射率图像特征的冰雹暴雨识别[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 489-500. [Lu Zhiying, Liu Hai, Jia Huizheng, et al. Recognition of hail and rainstorm based on the radar reflectivity image features[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 489-500.]

[20] 段鹤, 严华生, 马学文, 等. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象, 2014, 40(2): 174-185. [Duan He, Yan Huasheng, Ma Xuewen, et al. Study of the method for hail forecasting and warning in southern Yunnan[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(2): 174-185.]

[21] 王昀, 谢向阳, 马禹, 等. 天山北侧成灾雹云移动路径及预警指标的研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1152-1164. [Wang Yun, Xie Xiangyang, Ma Yu, et al. Moving paths and nowcasting indicators of radar of hail cloud in northern Tianshan Mountains[J] . Arid Land Geography, 2017, 40(6): 1152-1164.]

[22] 王昀, 卢品睿, 王旭. 天山南侧喀什地区冰雹潜势预报及预警指标的研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 937-944. [Wang Yun, Lu Pinrui, Wang Xu. Nowcasting indicators of radar of hail cloud in southern Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2018, 41 (5): 937-944.]

[23] 钟敏, 郭英莲, 陈璇, 等. 基于客观分型的冰雹概率预报方法研究[J/OL]. 高原气象: 1-11[2021-10-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.P.20210716.0901.022.html. [Zhong Min, Guo Yinglian, Chen Xuan, et al. Study on hail probability forecast method based on objective classification[J/OL]. Plateau Meteorology: 1-11

[2021- 10- 20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.P.20210716.0901.022.html.]

[24] 吴海英, 曾明剑, 蒋义芳, 等. 一次雹暴过程中对流系统演变特征的模拟分析[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 569−579. [Wu Haiying, Zeng Mingjian, Jiang Yifang, et al. Simulation analysis of evolution characteristics of the convective system during a hail storm course[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 569−579.]

[25] 郭玉凤. 巴彦淖尔市冰雹预报方法应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. [Guo Yufeng. Application of Hail Forcast Methods in Bayannur of Inner Mongolian Autonomous Region[D]. Beijing: Chines Academy of Agricultural Sciences, 2009.]

[26] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 内蒙古生态环境敏感性综合评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 591−598. [Liu Junhui, Gao Jixi, Ma Su, et al. Comprehensive evaluation of eco-environmental sensitivity in Inner Mongolia, China[J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 591−598.]

[27] 杨宁, 苏德斌, 苏立娟, 等. 冰雹云探测技术研究进展——基于巴彦淖尔人工防雹技术研究试验[J]. 气象科技进展, 2021, 11(5): 141−148. [Yang Ning, Su Debin, Su Lijuan, et al. Research progress of hail cloud observation technology: Based on field campaigns in Bayannur[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(5): 141−148.]

Movement paths and characteristics of hail clouds in Bayannur, Inner Mongolia

YU Shuiyan[1,2,3,4], BI Lige[2,3,4], SU Lijuan[2,3,4], LIU Jidong[5], SHI Jinli[2,3,4],
YI Na'na[2,3,4], FAN Ruxia[2,3,4], XU Zhili[2,3,4]

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;
2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. Meteorological Science Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;
4. Inner Mongolia Key Laboratory of Weather Modification, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;
5. Bayannur Meteorological Bureau, Bayannur 015006, Inner Mongolia, China)

Abstract: Bayannur is an important agricultural and animal husbandry production area. The ecological environment in this area is highly sensitive. In addition, hail frequently occurs in this area. This paper used the manual records of 67 ground anti-hail operation sites in Bayannur, western Inner Mongolia, from 2009 to 2019 and the weather radar data of Linhe Station to statistically analyze the movement paths and characteristics of hail clouds in this area. Results showed that the moving paths of hail clouds in Bayannur in the past 11 years were primarily northwest, southwest, and west. The occurrence frequency of hail cloud in the northwest route was the highest (46.70%), and its moving distance during the heavy hailstorm phase was the longest (23.86 km). Moreover, the duration of the heavy hailstorm was longer (40.25 min). In summer (June-August), the impact of hail disasters should be paid attention to. The hail cloud in July and August can develop in a short time (14.09 and 17.00 min) and a short moving distance (5.49 km and 8.48 km). In the mature stage, the movement slowly and continuously affected the cloud coverage. In this region, hail clouds are devastating during these months. The time period with the highest initial frequency of hail cloud source points was concentrated between 13:00 and 15:00, whereas hail primarily occurred between 14:00 and 17:00. The hail cloud and hail in Bayannur are primarily due to water vapor and dynamic hail, which can reach 79.44%. Under dynamic conditions, hail is primarily due to the northwest paths (68.57%), and under water vapor conditions, hail is primarily due to the northwest paths, southwest paths, and west paths (96.00%). The characteristics of the movement paths of the hail clouds in Bayannur in the past 11 years showed that the hail clouds along the northwest paths in summer were the most disastrous.

Keywords: hail cloud; movement paths; hail; western Inner Mongolia